



УДК 621.313.3

О вопросах расчета индуктивности катушек в приложениях к электротехнологическим установкам**On the questions of calculating inductance of coils in applications to electrotechnical units**

Шмаков Евгений Игоревич, студент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Shmakovz@mail.ru, Тел.: +7(912)620-18-46

Тарчуткин Николай Владиславович, студент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: nik_tar@mail.ru

Смолянов Иван Александрович, учебный мастер каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: i.a.smolianov@urfu.ru

Evgeniy I. Shmakov, student, Department «Elektrotehnika i elektrotehnologicheskie sistemi», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Shmakovz@mail.ru. Ph.: +7(912)620-18-46

Nikolay V. Tarchutkin, student, Department «Elektrotehnika i elektrotehnologicheskie sistemi», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: nik_tar@mail.ru

Ivan A. Smolyanov, educational master, Department «Elektrotehnika i elektrotehnologicheskie sistemi», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.a.smolianov@urfu.ru

Аннотация: В данной работе рассматривается способ учета индуктивностей катушек индуктора электротехнологической установки при расчете электромагнитной задачи методом конечных-элементов в программе Comsol Multiphysics.

Abstract: In this paper, the method of taking into account the inductances of the inductor coils of an electrotechnical unit in the case when electromagnetic problem is calculated by the finite element method in the Comsol Multiphysics program is considered.

Ключевые слова: электротехнологические установки; собственная индуктивность; взаимная индуктивность.

Key words: electrotechnical unit; inductance; mutual inductance.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнологии получили довольно широкое применение в современной промышленности. Осуществляя такие функции как нагрев, дозирование, перемешивание, транспортировку металлов и еще множество других функций. Данное обстоятельство обеспечивает развитие подобных установок, а как известно появление новых установок неотъемлемо связано с процессом проектирования.

Во время проектирования во многих случаях применяют моделирование будущей установки, потому что оно позволяет получить необходимую информацию об объекте исследования без физического создания этого объекта. Данное

обстоятельство помогает ускорить процесс проектирования и рационально использовать имеющиеся ресурсы. В последнее время научно-технический прогресс набрал высокие темпы развития, благодаря применению вычислительной техники и новейших программных пакетов, облегчающих процесс моделирования новых установок.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Индуктор является основной частью многих видов электротехнологических установок, в которых используется электромагнитное поле. А его основными параметрами, с точки зрения электротехники, являются активные и индуктивные сопротивления. Данные параметры

необходимы для составления схем замещения, расчета источника питания и проектирования систем автоматического управления.

В данной работе будет уделено внимание расчету индуктивности модели, рассчитанной с применением конечно-элементного метода в среде моделирования физических процессов Comsol Multiphysics.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В качестве расчетной модели был выбран индуктор с катушками кольцевого типа. Подобные индуктора могут использоваться в линейных асинхронных двигателях (ЛАД) [1]. Данная конфигурация позволяет соединять катушки различными способами, что будет влиять на электромеханические характеристики ЛАД. Геометрические параметры данного индуктора сведены в табл. 1, а физические свойства материалов в табл. 2. Трехмерная модель индуктора представлена на рис. 1. А расчетная модель с построенной сеткой показана на рис. 2.

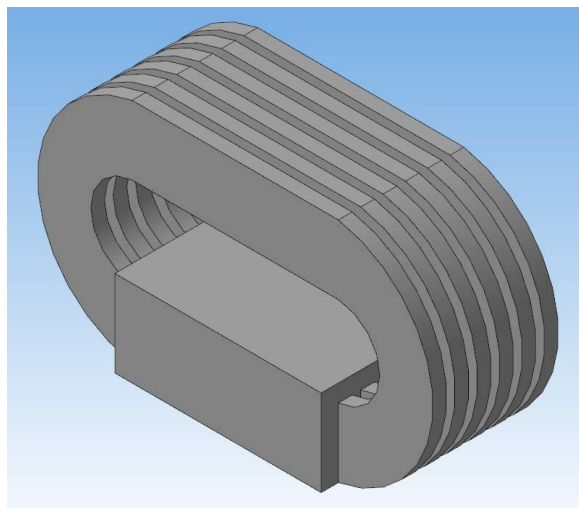


Рис. 1. Трехмерная модель индуктора ЛАД

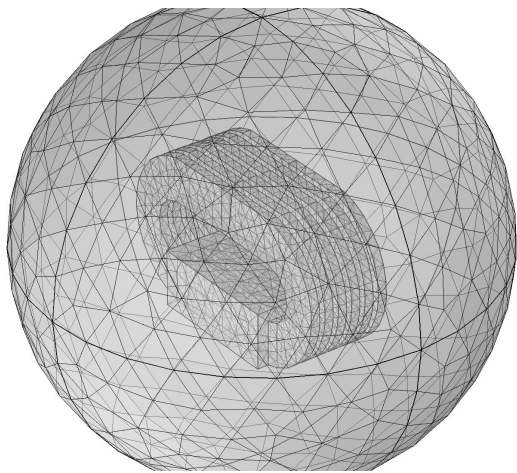


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная сетка

Таблица 1.

Геометрические параметры модели

Символ	Описание	Значение, мм
B_z	Ширина зуба	5
B_p	Ширина паза	8
H_p	Высота паза	40
H_i	Высота магнитопровода индуктора	50
B_i	Ширина индуктора	120
L	Длина индуктора	93
Q	Число пазов	6
q	Количество пазов на полюс и фазу	1

Таблица 2.

Значения свойств материалов частей модели

Материал	Свойство [ед. изм.]	Значение
Магнитопровод индуктора	γ [См/м]	11,2
	μ_r [-]	1200
Катушки индуктора	γ [МСм/м]	59,98
	μ_r [-]	1
Воздух	γ [См/м]	1
	μ_r [-]	1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Магнитное поле в данной работе рассчитывалось в частотной области, при частоте питания сети равной 50 Гц. Данный подход уменьшает время расчета модели, так как задачи рассматривается как квазистационарная. Также при решении задачи используется универсальная физическая величина – векторный магнитный потенциал. Все уравнения, описывающие модель представлены ниже [3].

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B}, \quad (1)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) + j\omega\mu\gamma = \mu\vec{J}, \quad (2)$$

где \vec{A} – векторный магнитный потенциал, \vec{B} – вектор магнитной индукции, μ – магнитная проводимость среды, γ – электрическая проводимость, ω – циклическая частота, \vec{J} – вектор плотности тока.

Индуктивность – это величина, показывающая пропорциональную зависимость потокоцепления контура с током обуславливающее это потокоцепление [2].

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad (3)$$

где L - величина индуктивности, Ψ - потокосцепление с контуром катушки, I - ток протекающий в катушке.

Так как в индукторах используются многovitковые катушки, то придерживаются допущения, что магнитный поток, пронизывающий каждый виток одинаков, следовательно, потокосцепление контура описывается следующей зависимостью:

$$\Psi = \Phi \cdot N, \quad (4)$$

где Φ - магнитный поток через катушку, N - количество витков в катушке.

Как видно из уравнения (3) и (4) вся задача определения индуктивности сводится к определению магнитного потока через контур катушки. Магнитный поток определяется по следующей зависимости:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

$$d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}, \quad (6)$$

где $d\vec{S}$ - вектор элемента площади, \vec{n} - вектор нормали площади.

Также, исходя из уравнения (1), можно перейти к другой зависимости, используя теорему Стокса:

$$\Phi = \iint_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{S} = \oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

Подставив выражения (5) и (7) в (3), получим следующую зависимость:

$$L = \frac{N \cdot \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}}{I} = \frac{N \cdot \oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l}}{I} \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет индуктивности катушек, представляет собой многоступенчатую задачу, это связано с тем, что разделяют собственную индуктивность, показывающая отношение потокосцепления катушки, вызванное током в этой катушке, и тока протекающим в этой катушке, и взаимную индуктивность, показывающую отношение потокосцепления катушки, вызванное током в другой катушке, и тока протекающим в той катушке. Данные утверждения, представлены в следующих формулах:

$$L_1 = \frac{\Psi_1}{I_1}, \quad (9)$$

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_2}, \quad (10)$$

где L_1 - величина собственной индуктивности, Ψ_1 - потокосцепление с контуром первой катушки, I_1 - ток протекающий в первой катушке, M_{12} - величина взаимной индуктивности двух катушек, Ψ_{12} - потокосцепление с контуром первой катушки, I_2 - ток протекающий во второй катушке

Исходя из этого, необходимо определить потокосцепление катушек только при одной включенной катушке, чтобы определить собственную индуктивность этой катушки и взаимные индуктивности с другими катушками. Расчет потокосцеплений катушек осуществлялся с помощью построения дополнительных плоскостей, охватывающих область, ограниченную катушками. Данные плоскости размещались по середине аксиальных длин катушек как это показано, на рис. 3. Разным цветом обозначены плоскости каждой середин катушки (черный – первый, ...), такая маркировка соответствует обозначениям индуктивностей на гистограмме (Рис. 4).

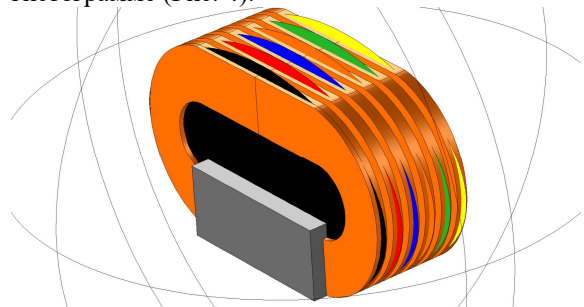


Рис. 3. Размещение расчетных плоскостей

Расчет производился для шести случаев, в каждом случае ток протекал только по одной из катушек. Исходя из уравнений (6) и (8), расчетная формула для индуктивности будет следующая:

$$L = \left| \frac{N \cdot \iint_S (B_x \cdot n_x + B_y \cdot n_y + B_z \cdot n_z) \cdot dS}{I} \right| \quad (11)$$

Для удобства восприятия полученные данные были представлены в виде табл. 3 и гистограммы, представленных на рис. 4.

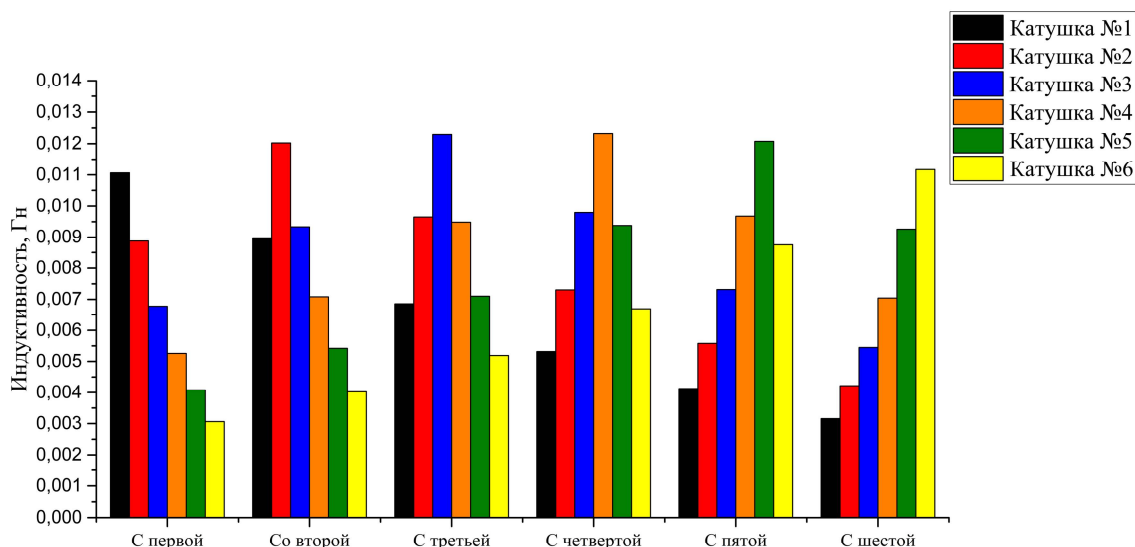


Рис. 4. Гистограмма индуктивностей

Таблица 3.

Значения индуктивностей

L , Гн	Катушка №1	Катушка №2	Катушка №3	Катушка №4	Катушка №5	Катушка №6
С №1	0,0111	0,0089	0,0068	0,0053	0,0041	0,0031
С №2	0,0090	0,0120	0,0093	0,0071	0,0054	0,0040
С №3	0,0069	0,0096	0,0123	0,0095	0,0071	0,0052
С №4	0,0053	0,0073	0,0098	0,0123	0,0094	0,0067
С №5	0,0041	0,0056	0,0073	0,0097	0,0121	0,0088
С №6	0,0032	0,0042	0,0054	0,0070	0,0093	0,0112

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был показан пример расчёта индуктивности катушек применительно к электротехнологическим установкам.

Из результатов видно, что собственная индуктивность катушек примерно одинакова и составляет $\approx 0,012$ Гн, отличными значениями обладают крайние катушки, индуктивность которых меньше на 8,3% по отношению к остальным катушкам. Это может быть вызвано тем, что крайние катушки находятся на краях магнитопровода, что сказывается на замыкании магнитных полей.

Подобный расчет обеспечивает наглядное представление об изменении взаимной индуктивности катушек по мере из удаления. Взаимная индуктивность наиболее удаленных катушек индуктора составляет примерно 27% от собственной индуктивности большинства катушек.

Данный метод требует значительных затрат времени, так как необходимо вручную рассматривать случаи, в которых ток протекает только в одной катушке. В установках, с большим количеством пазов, например, линейный асинхронный двигатель, это займёт значительное время. Поэтому в будущих работах планируется автоматизировать данный процесс с помощью связи программы Comsol Multiphysics с программой Matlab, в которой есть возможность запрограммировать порядок действий по расчету модели во всех необходимых случаях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Сарапулов, Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. – 2-е издание, перераб. и доп. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 431 с.
- [2] Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., переб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отделение, 1986. – 488 с.: ил.
- [3] Пособие к компьютерному пакету Comsol Multiphysics 5.3: Comsol Help Desk 5.3.